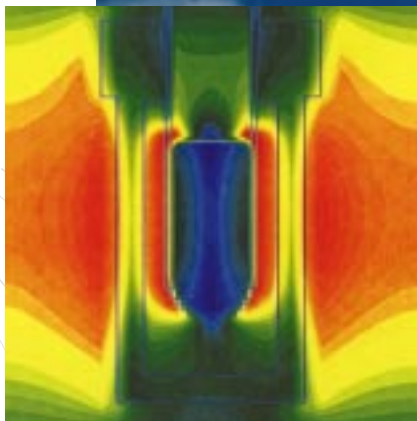
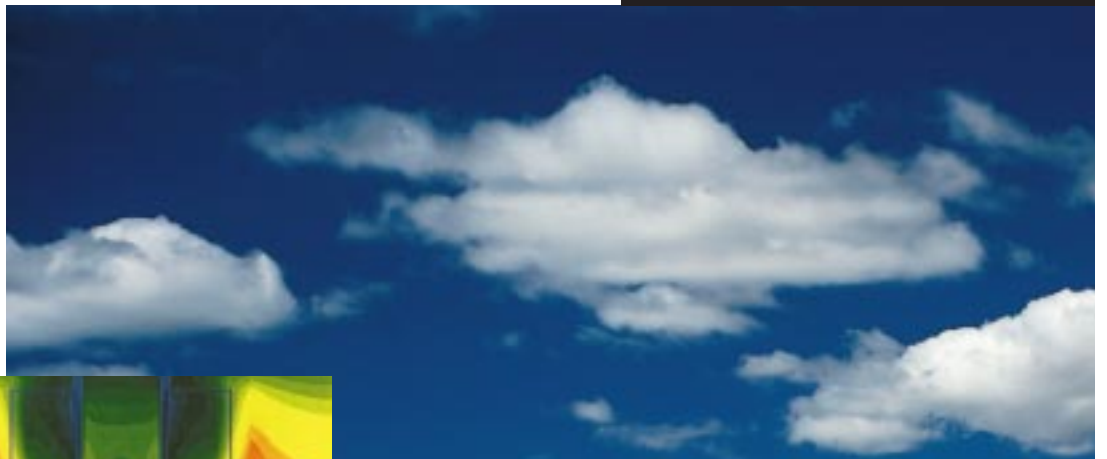


# Edition Wissenschaft

Forschungsgemeinschaft Funk e.V. · G 14515 · Ausgabe Nr. 14 · Juni 1998



Verbundvorhaben „Biologische Wirkungen  
hochfrequenter elektromagnetischer Felder“

## **Der Einfluß von hochfrequenten elektro- magnetischen Feldern auf den Zellzyklus und auf die Frequenz von Schwesterchromatidaustauschen Analysen an menschlichen Lymphozyten in Kultur**

Von A. Antonopoulos, G. Obe, K. Brinkmann, H. Eisenbrandt, J.P. Grigat,  
R. Elsner, W. Storbeck und G. Dehmel

## **Feldtheoretische Simulation der Hohlleitungs- Experimente zum Einfluß hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf humane periphere Lymphozyten**

Von V. Hansen und J. Streckert



Forschungsgemeinschaft Funk

Wissenschaft  
Edition

## Editorial

### Liebe Leserinnen und Leser!

Mit der vorliegenden Ausgabe liegt nun der zweite Beitrag (s. Edition Wissenschaft 13/97) zu einer Reihe von Untersuchungen zum Forschungsvorhaben „Biologische Wirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder“ vor. In diesem Rahmen wurde die Wirkung von elektromagnetischen Feldern, wie sie durch Mobilfunkgeräte und Funkssysteme der Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) entstehen, auf menschliche und tierische Zellen untersucht.

Das Teilprojekt „Analysen an menschlichen Lymphozyten in Kultur“ wurde an der Universität-Gesamthochschule-Essen im Fachbereich Genetik durchgeführt. An der Universität Braunschweig und an der Bergischen Universität Wuppertal wurden die dafür benötigten Berechnungen für die Expositionsanlagen vorgenommen.

Bei den Experimenten wurde das Wachstumsverhalten und die Struktur der Chromosomen in menschlichen Lymphozyten untersucht. Beobachtet wurden Zellproliferation und Schwesterchromatidaustausche. Das Ergebnis der Wissenschaftler: Beide Phänomene wurden durch hochfrequente elektromagnetische Felder nicht beeinflusst.

*Gerd Friedrich*

## Inhalt

Verbundvorhaben „Biologische Wirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder“

### **Der Einfluß von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern auf den Zellzyklus und auf die Frequenz von Schwesterchromatidaustauschen: Analysen an menschlichen Lymphozyten in Kultur**

1 Vorwort	3
2 Einleitung	4
3 Material und Methoden	5
4 Ergebnisse und Diskussion	9
5 Literatur	10
6 Aufstellung der beteiligten Institute	12

Summary: The Effect of High-Frequency Electromagnetic Fields on Cell Cycle and Sister-Chromatid Exchanges: Analyses with Human Lymphocytes in Culture	13
---	----

### **Feldtheoretische Simulation der Hohlleitungs-Experimente zum Einfluß hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf humane periphere Lymphozyten**

1. Einleitung und Übersicht	14
2. Anforderungen an die HF-Expositionseinrichtungen	14
3. Lösungskonzept	16
4. Numerische Feldberechnungen	18
5. Zusammenfassung	22
6. Literatur	22

Summary	23
---------	----

**Teilprojekt zum Forschungsvorhaben  
„Biologische Wirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder“:**

# **Der Einfluß von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern**

**auf den Zellzyklus und auf die Frequenz von Schwesterchromatid-  
austauschen: Analysen an menschlichen Lymphozyten in Kultur**

Dipl.-Biol. Alexandra Antonopoulos, Prof. Dr. rer. nat. Günter Obe,  
Fachbereich 9 - Genetik, Universität-Gesamthochschule Essen

Prof. K. Brinkmann, Dipl.-Ing. H. Eisenbrandt, Dipl.-Ing. J.P. Grigat, Forschungsverbund:  
Elektromagnetische Verträglichkeit biologischer Systeme, Technische Universität Braunschweig

Prof. R. Elsner, Dipl.-Ing. W. Storbeck, Dr. Ing. G. Dehmel, Institut für Nachrichtentechnik,  
Technische Universität Braunschweig

## **1 Vorwort**

In diesem Verbundvorhaben wurde die Wirkung von elektromagnetischen Feldern, wie sie beim Einsatz von Mobilfunkgeräten (D- und E-Netz) und bei Funksystemen der Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) entstehen, auf menschliche und tierische Zellen untersucht.

Ausgangspunkt waren die Forschungsergebnisse des ersten Projekts, das von der FGF in den Jahren 1993 bis 1994 gefördert wurde (Lit. 1-4). Von besonderem Interesse war hier die Frage, ob elektromagnetische Felder oberhalb eines bestimmten Schwellen-

wertes der Leistungsdichte einen möglichen athermischen Einfluß auf biologische Systeme haben. Im ersten Forschungsabschnitt wurden die Untersuchungen mit Leistungsdichten durchgeführt, die in der Größenordnung liegen, wie sie bei heute gebräuchlichen Mobilfunktelefonen auftreten und den zugelassenen Grenzwerten entsprechen. Für die biologische Wirkung von hochfrequenter Strahlung ist die vom Körper aufgenommene Strahlungsleistung maßgebend. Eine Basisgröße für thermische Wirkungen ist die spezifische Absorptionsrate (SAR), die in Watt pro Kilogramm (W/kg) angegeben wird. Biologische Wirkungen aufgrund von Wärmeentwicklung treten erst dann auf, wenn ein

bestimmter Schwellenwert überschritten wird. In Tierexperimenten konnten Wirkungen (etwa Störung des Stoffwechsels oder der Wärmeregulierung) erst nachgewiesen werden, wenn sich die Körpertemperatur um mehr als 1 Grad Celsius erhöhte. Nach neueren Befunden führen SAR-Werte von 1 bis 4 W/kg (gemittelt über den ganzen Körper) beim Menschen innerhalb von 30 Minuten zu einer Temperaturerhöhung von etwa 1 Grad Celsius. Zum Schutz der allgemeinen Bevölkerung wurde daher ein um den Faktor 50 kleinerer Wert (80 mW/kg) als internationaler Grenzwert von der ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) festgelegt (Lit. 5).

Allerdings werden athermische Wirkungen befürchtet, die auch bei Einhaltung der Grenzwerte zu Beeinflussungen von Lebewesen führen könnten. Deshalb wurde im Mobilfunkbereich mit einem Vielfachen des Ganzkörper-Grenzwertes von 80 mW/kg (DIN 0848) exponiert.

Die Projektleitung führte in Zusammenarbeit mit Prof. R. Elsner und Prof. V. Hansen die notwendigen Berechnungen durch und stattete die beteiligten Institute mit den notwendigen technischen Ausrüstungen aus. Die Berechnungen zu den Abmessungen der Hohlleiter mit den integrierten Probenhaltern sind in den Berichten von Prof. Hansen (Lit. 6, Lit. 7) dargelegt. Der Bau der Expositionseinrichtungen und die erforderlichen Berechnungen für die Exposition in der TEM-Zelle wurden in Braunschweig durchgeführt (Lit. 8).

Als biologisches Versuchsmaterial dienten einzelne normale und entartete menschliche sowie tierische Zellen, die in den Instituten als gut bekannte und etablierte Modelle zur Verfügung stehen.

Der erste Ansatz untersuchte das Wachstumsverhalten und die Struktur der Chromosomen in menschlichen Lymphozyten. Beobachtet wurden Zellproliferation und Schwesterchromatidaustausche (SCE). Diese Versuche wurden von Prof. G. Obe und Frau Dipl.-Biol. A. Antonopoulos in der Abteilung Genetik der Universität-Gesamthochschule Essen durchgeführt.

Der zweite Ansatz betrifft das Zellwachstum menschlicher Tumorzellen. Diese Untersuchungen

wurden vom Leiter der Arbeitsgruppe „EMV biologischer Systeme“ Dr. med. R. Fitzner und seiner Mitarbeiterin Frau E. Langer im Institut für Klinische Chemie und Pathobiochemie (damaliger kommissarischer Direktor: Prof. Dr. med. W. Reuter) an der FU Berlin durchgeführt (Lit. 9).

Der dritte Ansatz betrifft die Calciumregulation in Zellen. Calcium ist einer der wichtigsten Mediatoren für intrazelluläre Abläufe wie Zellbewegung oder Muskelkontraktion. Es wird derzeit diskutiert, ob elektromagnetische Felder den Calciumstrom durch die Zellmembran verändern, wodurch physiologische Vorgänge in Zellen beeinflusst werden. Diesen Aspekt hat PD Dr. R. Meyer am Physiologischen Institut der Universität Bonn untersucht (Lit. 10).

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse aller Projekte ist im VDE-Verlag unter dem Titel: Biologische Wirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder des Mobil- und Polizeifunks erschienen (Lit. 32).

Im folgenden werden die Befunde an menschlichen Lymphozyten aus der Universität-Gesamthochschule Essen detailliert dargestellt.

## 2 Einleitung

Epidemiologische Untersuchungen zeigen einen bestenfalls schwachen Zusammenhang zwischen Expositionen mit elektromagnetischen Feldern (EMF) und Krebserkrankungen (Lit. 11, 12). Dennoch haben gerade diese Studien, beginnend mit den Analysen von Wertheimer und Leeper (1979, (Lit. 13)) bis heute zu großer Beunruhigung in der Bevölkerung (Stichwort „Elektrosmog“) geführt. Ein weiteres Ergebnis der epidemiologischen Analysen ist eine intensive Forschungstätigkeit zur Frage möglicher zellulärer Effekte von EMF, die eine Erklärung für die mögliche Krebsinduktion geben könnten (Lit. 14). Prinzipiell wären zwei Möglichkeiten zu diskutieren: (1) EMF könnten zu einer Schädigung der zellulären DNS führen, oder (2) EMF könnten zellphysiologische Prozesse beeinflussen.

Zu Aspekt (1) wäre zu sagen, daß die weitaus meisten experimentellen Analysen keine DNS-schädigende Wirkung nachweisen konnten. Hierbei wurden Strangbrüche in DNS, Mutationen in Mikroorganismen, chromosomale Schäden und Veränderungen an Mikrokernen in Zellen in Kultur,

	E-Netz	D-Netz	Digitaler Polizeifunk
Frequenz	1,8 GHz	0,9 GHz	380 MHz
Abmaße der Felderzeuger	79 x 158 x 1300 mm <sup>3</sup>	129,5 x 259 x 1300 mm <sup>3</sup>	600 x 600 x 600 mm <sup>3</sup>
Tastverhältnis V <sub>T</sub>	8,5	8,33	4,32
$\overline{SAR}$	1.700 mW/kg	208 mW/kg	82,9 mW/kg

Tabelle 1: Übersicht der Versuche

Abb. 1:  
Geöffneter Hohlleiter (rechts) für Exposition bei 1800 MHz und Kontrollbox (links) mit den dazugehörigen Probenhaltern (unten)



Genmutationen in Säugetierzellen, Mutationen bei *Drosophila* und Mäusen und Chromosomenschäden bei Pflanzen und exponierten Personen untersucht (Lit. 10, 15, 16). Mutationen sind eine Voraussetzung für die Entstehung von Krebs, sie stellen das initiiere Ereignis dar. Die bisher vorliegenden Ergebnisse weisen eher darauf hin, daß EMF Krebs nicht initiieren können.

EMF könnten für die Krebsentstehung auch dann von Bedeutung sein, wenn sie die Geschwindigkeit des Teilungszyklus der Zelle beeinflussen würden. Wenn eine Zelle Schäden in ihrer DNS aufweist, verharrt sie länger als normal in dem Zellzyklusstadium (G1-Phase), das vor Beginn der DNS-Synthesephase (S-Phase) liegt. In der G1-Phase kommt es dann zur Reparatur der Schäden. Wird dieser G1-Block aufgehoben, können nicht alle Schäden repariert werden, und es besteht ein erhöhtes Risiko für die „Fixierung“ von Mutationen und in deren Folge zur Krebsentstehung.

EMF von 50 Hz/5 mT induzieren tatsächlich eine Beschleunigung der Zellzyklen von menschlichen peripheren Lymphozyten (HPL) in

Kultur (Lit. 18, 19). Ähnliche Befunde wurden auch von anderen Arbeitsgruppen erhoben (Lit. 20). Hier werden Analysen zur Wirkung von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern (HF-EMF) auf die Zellzyklen und auf Schwesterchromatidaustausche (SCE) dargestellt.

## 3 Material und Methoden

### 3.1 Versuchsaufbauten

Zur Beurteilung der Expositionsversuche ist die Feldstärke in der Flüssigkeit, in der sich die Zellen befinden, zu bestimmen. Feldstärkemessungen scheiden wegen der geringen Abmessungen und der Leitfähigkeit des Nährmediums aus. Eine analytische Berechnung ist aufgrund der komplizierten Geometrie ebenfalls nicht möglich. Daher wurden mit einem numerischen Berechnungsverfahren über die Röhrchen gemittelte SAR-Werte bestimmt. Genauere Aussagen über die Berechnungen enthält Lit. 6, Lit. 8 und Lit. 32. Bei der Betrachtung athermischer

Wirkungen ist zu beachten, daß der Mobilfunk und der digitale Polizeifunk mit dem Tastverhältnis  $V_T$  arbeitet. Daher ist der während der Sendezeit verfügbare SAR-Wert um den Faktor  $V_T$  größer als der zeitlich gemittelte (Tabelle 1).

In Abhängigkeit von dem zu untersuchenden Frequenzbereich fand die Exposition der Zellen in verschiedenen Felderzeugern statt, für die entsprechende unterschiedliche Ansteuerungen eingesetzt wurden. Daher wird zunächst anhand des Versuchsaufbaus für das E-Netz das gesamte Versuchsdesign beschrieben. Im Vergleich dazu werden in den darauffolgenden Kapiteln die Unterschiede zum Aufbau für das D-Netz und den Polizeifunk erläutert.

#### 3.1.1 Aufbau für die E-Netz-Untersuchungen

Für die Untersuchungen im D- und E-Netz wurden vom Institut für Nachrichtentechnik Hohlleiter als Felderzeuger mit Abmessungen, die den Berechnungen von Prof. V. Hansen (Lit. 6) entsprechen, aufgebaut. In den 1800-MHz-Hohlleitern wurden über einen Signalgenerator mit nachgeschaltetem Verstärker die mit 217 Hz pulsmodulierten Signale des E-Netzes bei 1800 MHz eingespeist (Abb. 1, Abb. 2). Diese breiten sich als Welle im Hohlleiter aus. Am anderen Ende des Hohlleiters ist ein Absorberkeil angebracht, der eine Reflexion der sich ausbreitenden Welle und die daraus resultierende stehende Welle im Hohlleiter dämpft. In die herausnehmbare Hohlleiterwand ist ein rechteckförmiger

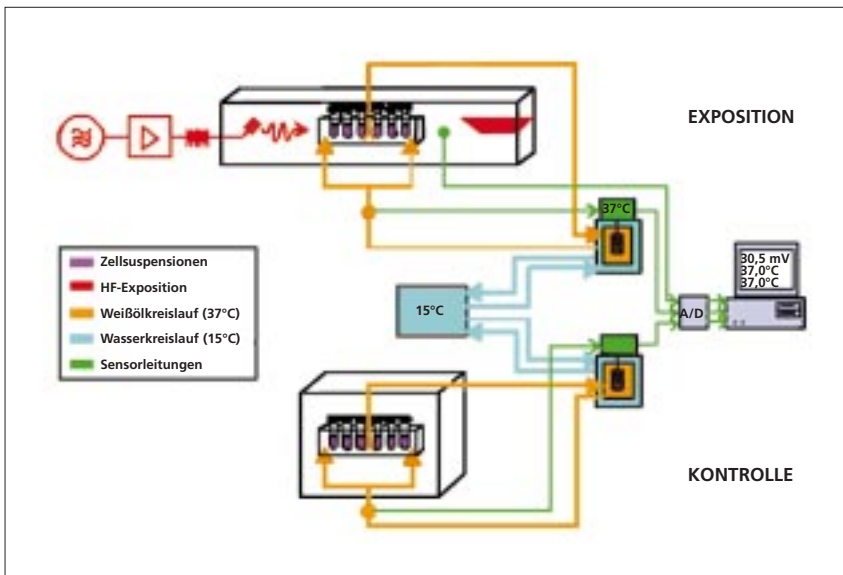


Abb. 2: Versuchsdesign für die Versuche bei 900 und 1800 MHz

Probenhalter eingebaut, der 6 Probenröhrchen (Durchmesser: 17 mm) aufnehmen kann.

Im Probenhalter werden die Probenröhrchen von temperiertem Weißöl umströmt und damit auf einer konstanten Temperatur von  $37^{\circ}\text{C} \pm 0,1^{\circ}\text{C}$  gehalten. Um einen möglichen Einfluß des 50-Hz-Feldes auf die Proben auszuschließen, werden die Geräte für die Signalerzeugung, Temperierung und Protokollierung in einem Abstand von etwa 2 m von den Probenhaltern aufgestellt. Die Wärmebäder sind mit den Probenhaltern über wärmeisolierte Schläuche verbunden. Die Temperaturregelung erfolgt über einen externen Temperatursensor, der sich im Weißölkreislauf kurz vor den Proben befindet. Über einen zweiten geschlossenen Wasserkreislauf wird ständig für Kühlung der Bäder gesorgt und das Driftverhalten der Temperaturregelung verringert. Ein zweiter, baugleicher Probenhalter wird zur Kontrolle in einem HF-dichten

Behälter aufgestellt, so daß Fremdeinflüsse ausgeschlossen werden.

Während der gesamten Versuchsdauer wird die in den Hohlleiter eingespeiste Leistung von einem Computer überwacht. Neben dem HF-Signal werden auch die von den beiden Temperatursensoren gelieferten Daten regelmäßig aufgezeichnet.

Unter identischen Versuchsbedingungen werden Zellen von dem gleichen Blutspender zeitgleich in

Gegenwart und in Abwesenheit eines HF-Feldes kultiviert. Nach Abschluß eines Versuchs werden die Ergebnisse miteinander verglichen.

### 3.1.2 Aufbau für die D-Netz-Untersuchungen

Der Aufbau für das D-Netz unterscheidet sich von dem des E-Netzes nur in dem Hohlleiter, dessen Querschnittsabmessungen auf die D-Netz-Frequenz von 900 MHz angepaßt wurde (Tabelle 1).

### 3.1.3 Aufbau für die Polizeifunk-Untersuchungen

Für die Untersuchungen im Frequenzbereich des digitalen Polizeifunks wurde eine TEM-Zelle in den Versuchsaufbau integriert (Abb. 3). Die Exposition der Blutzellen in der TEM-Zelle erfolgte bei 380 MHz mit 17,65 Hz gepulst bei einem SAR-Wert von 82,9 mW/kg (Tabelle 1). Nur während der Burstdauer von 13,11 ms wird eine Leistung von 90 W in die Zelle eingespeist. Mit der so bestimmten thermischen, zeitlich gemittelten Leistung wird in der

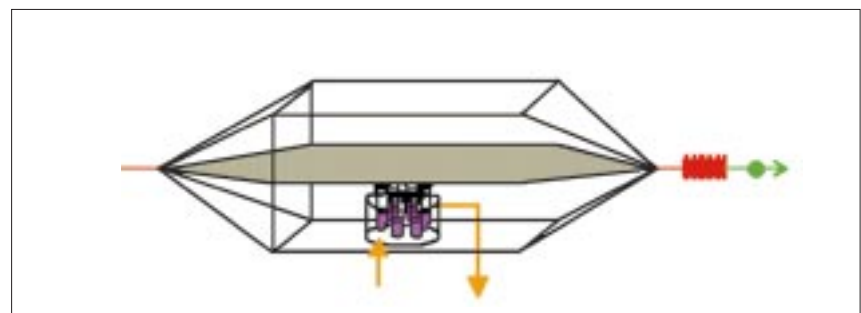


Abb. 3: Für die Exposition bei 380 MHz wird eine TEM-Zelle in den Aufbau (Abb. 2) integriert.

TEM-Zelle im betrachteten Volumen der Nährlösung der mittlere SAR-Wert von 82,9 mW/kg erreicht.

### 3.2 Blutkulturen

In jeder Versuchsreihe wurden 15 heparinisierte (zur Gerinnungshemmung) Blutproben von verschiedenen Spendern (männlich und weiblich) aus der Blutbank des Universitätsklinikums Essen untersucht. Für die feldexponierten wie für die Kontrollkulturen wurden jeweils 5 ml Kulturen bei 37°C inkubiert. Die Kulturen enthielten 0,5 ml Vollblut, 4,6 ml McCoy's 5A Medium mit 10 % fötalem Kälberserum (Gibco), sowie 0,12 ml Phytohämagglutinin (PHA; Gibco), Antibiotika (Penicillin, Streptomycin) und 5-Bromdesoxyuridin (BrdUrd, Serva; Endkonzentration  $2 \times 10^{-5}$  M). Die Kultivierung erfolgte in Präzisionsölbädern.

Die Kulturen jeder Blutprobe wurden in Gegenwart von HF-EMF für 48, 52, 56, 64 und 68 Stunden inkubiert, inklusive einer 2-stündigen Behandlung mit Colcemid (0,08 µg/ml) zur Arretierung der Zellen in einem mitoseähnlichen Stadium. In diesem Stadium sind die Chromosomen einzeln erkennbar und somit für die Chromosomenanalyse geeignet. Nach den genannten Kultivierungszeiten wurden die Zellen für die mikroskopische Analyse vorbereitet. Zu jedem Zeitpunkt wurde eine exponierte Kultur und eine Kontrollkultur aufgearbeitet. Folgende HF-EMF wurden verwendet: 380 MHz (gepulst mit 17,65 Hz), 900 und 1800 MHz (jeweils gepulst mit 217 Hz).

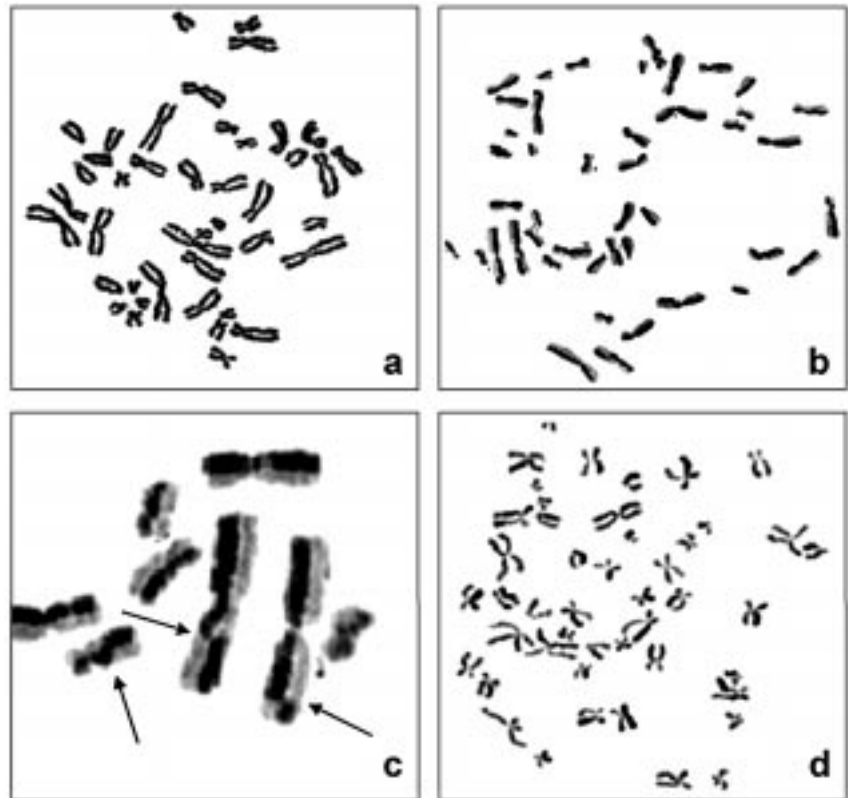


Abb. 4: Erste (M1, a), zweite (M2, b), dritte und weitere (M3+, d) Metaphasen von menschlichen peripheren Lymphozyten in Kultur. In (b) sind SCE erkennbar. (c) ist eine vergrößerte Region von (b), SCE sind mit Pfeilen gekennzeichnet.

Die SAR-Werte betragen: 82,9 mW/kg bei 380 MHz, 208 mW/kg bei 900 MHz, 1700 mW/kg bei 1800 MHz.

### 3.3 Chromosomenpräparation

Die Zellen wurden bei 900 U/min zentrifugiert, das überstehende Medium verworfen und das Pellet anschließend für 10 min in 5 ml hypotoner Lösung (0,075 M KCl) resuspendiert. Es folgte eine zweite Zentrifugation, nach der die Zellen in frisch angesetztem Fixativ (Methanol:Eisessig 3:1) fixiert wurden. Die Zellen wurden so oft in diesem Fixativ gewaschen, bis der Überstand klar war.

Dann wurden die Zellen je nach Pelletgröße in 0,5 bis 1 ml Fixativ resuspendiert und auf gekühlte Objektträger aufgetropft. Die Objektträger wurden für einige Tage bei Raumtemperatur getrocknet und dann differentiell gefärbt. Dieses Verfahren beinhaltet eine 20-minütige Färbung mit dem Fluoreszenzfarbstoff Hoechst 33258 (Bisbenzimid, 0,45 %), gefolgt von einer UV-Bestrahlung unter Erwärmung auf 60°C und anschließender Giemsa-Färbung (5 %) für 10 bis 12 min (Lit. 22).

BrdUrd (B) wird anstelle vom Thymin (T) in die replizierende DNA während der DNA-Synthese des Zellzyklus eingebaut. Nach einem Zellzyklus (M1) sind die Chromati-

den (Einzelstränge der Doppelstrang-DNA) noch einheitlich gefärbt (TB-TB). Nach zwei Zellzyklen (M2) sind beide Chromatiden differentiell mit BrdUrd substituiert (TB-BB). Nach drei oder mehr Zellzyklen (M3+) in BrdUrd-haltigem Medium finden sich sowohl vollständig substituierte als auch differentiell substituierte Chromosomen (TB-BB und BB-BB).

In differentiell gefärbten Chromatiden (TB-BB) sind die TB-Chromatiden dunkel und die BB-Chromatiden hell gefärbt. Dies erlaubt die Zuordnung der Metaphasen zu den von ihnen durchlaufenen Zellzyklusphasen: ein Zellzyklus (M1-Zellen; Chromosomen einheitlich gefärbt), zwei Zellzyklen (M2-Zellen; Chromosomen differentiell gefärbt), drei oder mehr Zellzyklen (M3+-Zellen; Chromosomen differentiell oder hell gefärbt). In M2-Zellen können zusätzlich SCE analysiert werden, die sich als hell-dunkel Wechsel

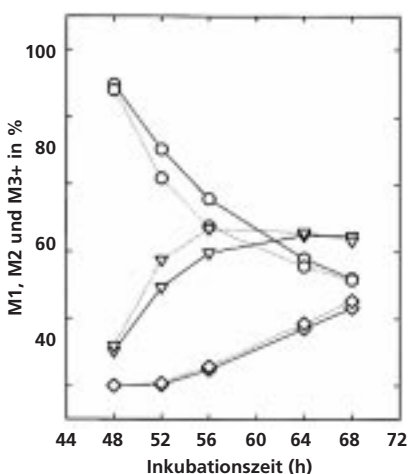


Abb. 5: Häufigkeiten von M1 (○), M2 (▽) und M3+ (◇) in Kulturen menschlicher peripherer Lymphozyten nach Befeldung mit 1800 MHz (---) und in nicht-befeldeten Kontrollkulturen (—). Die jeweiligen Datenpunkte sind Durchschnittswerte aus Kulturen von 15 verschiedenen Blutproben.

in den Chromatiden darstellen (Abb. 4).

### 3.4 Auswertung der Zellzyklusdaten

Die Prozentwerte für M1, M2 und M3+ wurden für jede Fixierungszeit nach Auswertung von 100 Zellen bestimmt (Abb. 5).

### 3.5 Auswertung der SCE-Frequenzen

Die SCE wurden in bis zu 50 differentiell gefärbten M2-Metaphasen ausgezählt, die nach 56 Stunden fixiert wurden. Ausgegeben wird die durchschnittliche Anzahl von SCE pro Zelle.

Insgesamt wurden bei 380 MHz 626 Zellen mit und 646 Zellen ohne Befeldung ausgewertet, bei 900 MHz entsprechend 565 und 595 Zellen und bei 1800 MHz 736 und 686 Zellen (Abb. 6 bis 9). Diese Zahlen sind dadurch bedingt, daß nicht immer 50 auswertbare M2-Zellen zu finden waren.

### 3.6 Statistische Analyse

Die Differenz ( $\Delta$ ) bezüglich M1, M2 und M3+ zwischen exponierten und nicht-exponierten Zellkulturen wurde für jeden Zeitpunkt berechnet. Wegen der beträchtlichen Variabilität zwischen den einzelnen Blutproben bezüglich der Zeitabhängigkeit von  $\Delta$  wurde auf einen zeitunabhängigen Effekt hin getestet. Die verwendete Formel war  $\Delta_{ij} = \mu + \text{Zeit}_i + \text{Subjekt}_j$ . Dabei ist  $\Delta_{ij}$  die Diffe-

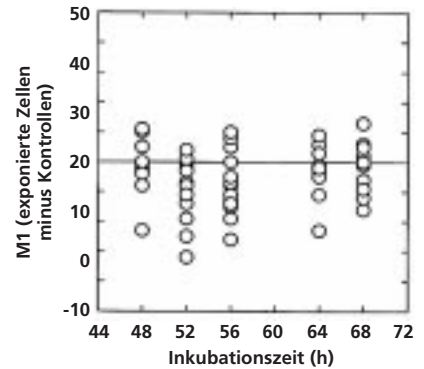


Abb. 6: Differenzen ( $\Delta$ ) der Frequenzen von M1 in Kulturen menschlicher peripherer Lymphozyten nach Befeldung mit 1800 MHz und nichtbefeldeten Kontrollkulturen. Die Werte schwanken um die 0-Linie (= kein Unterschied). Die Werte stellen die Ergebnisse von 15 verschiedenen Blutproben nach den auf der X-Achse angegebenen Kulturzeiten dar.

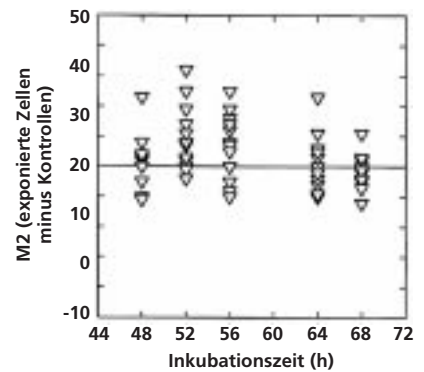


Abb. 7: Differenzen ( $\Delta$ ) der Frequenzen von M2 in Kulturen menschlicher peripherer Lymphozyten nach Befeldung mit 1800 MHz und nichtbefeldeten Kontrollkulturen. Weitere Erklärungen siehe Abb. 6.

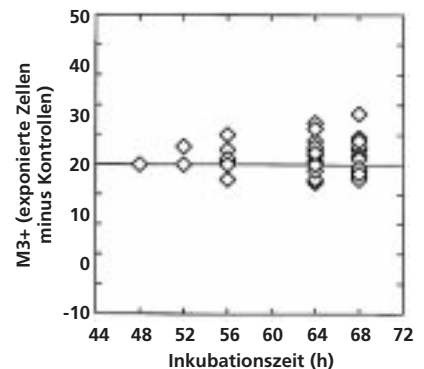


Abb. 8: Differenzen ( $\Delta$ ) der Frequenzen von M3+ in Kulturen menschlicher peripherer Lymphozyten nach Befeldung mit 1800 MHz und nichtbefeldeten Kontrollkulturen. Weitere Erklärungen siehe Abb. 6.



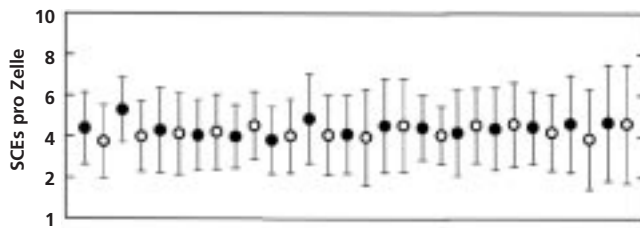


Abb. 9: SCE-Frequenzen in Kulturen von 15 verschiedenen Blutproben nach Befeldung mit 1800 MHz (○) und von nichtbefeldeten Kontrollkulturen (●). Die Fehlerbalken sind die Standardabweichungen (SD).

renz zwischen exponierten und nicht-exponierten Zellen zum Zeitpunkt  $i$  für das Subjekt  $j$  (Blutprobe);  $\mu$  ist der Mittelwert aller Proben, „Zeit“ und „Subjekt“ bedeuten die zeit- und subjektbezogenen Effekte (Lit. 18, 23). Hierfür wurde die Hypothese  $H_0: \mu = 0$  auf dem 5-%-Niveau getestet. Die für  $\Delta$  errechneten Verteilungen wurden als „Scatter Plots“ dargestellt.

Die SCE-Frequenzen wurden mit dem t-Test auf dem 5-%-Niveau auf statistische Signifikanz getestet.

## 4 Ergebnisse und Diskussion

In unseren Experimenten wurde die Geschwindigkeit des Zellzyklus und die Häufigkeit von SCE in menschlichen Lymphozyten nach Kultur in Gegenwart hochfrequenter elektromagnetischer Felder untersucht. Beide Phänomene wurden nicht beeinflusst (Lit. 24). Im gleichen Testsystem wurden die Zellzyklen in Gegenwart von 50-Hz/5-mT-Feldern beschleunigt aber auch diese Felder führten nicht zur Induktion von SCE (Lit. 18, 19). Eine Beschleuni-

gung des Zellzyklus könnte im Zusammenhang mit einer möglichen Krebsinduktion interessant sein. Sollte eine Zelle bereits Schäden in ihrer DNS aufweisen, würde sie in Gegenwart eines 50-Hz-Feldes schneller wachsen und hätte somit nicht genügend Zeit zur Reparatur der Schäden, die dann eine größere Chance hätten zu Mutationen umgewandelt zu werden (siehe Lit. 17). Dieser Vorgang wäre besonders dann zu erwarten, wenn die Zelle mit DNS-Schäden die S-Phase durchläuft oder in die Mitose eintritt. Eine Beschleunigung des Zellzyklus kann somit als promovierender oder auch kopromovierender Vorgang im Hinblick auf die Entstehung von Krebs angesehen werden. Ähnliche promovierende Effekte werden von Prof. Löscher und seinen Mitarbeitern (Lit. 25, 26, 27) diskutiert.

Menschliche Lymphozyten sind besonders gut für Zellzyklusanalysen geeignet. Im peripheren Blut befinden sie sich fast ausschließlich außerhalb des Zellzyklus (G0-Stadium).

Werden diese Zellen in Kultur genommen und einem mitogenen Stimulus ausgesetzt (hier Phytohämagglutinin), gehen sie weitgehend synchron in den Zellzy-

klus ein und werden mitotisch aktiv. Die Frequenzen erster, zweiter und dritter Mitosen in Kultur (M1, M2, M3+) sind somit gut geeignet, eine Aussage über die Zellzyklusgeschwindigkeit zu machen. Auch chromosomale Schäden wie etwa SCE lassen sich an diesen Zellen analysieren (Lit. 28, 29, 30, 31).

Der Zellzyklus kann auch infolge einer Temperaturerhöhung beschleunigt werden (Lit. 18). Es ist somit besonders wichtig, daß bei der Feldexposition keine Temperaturerhöhungen auftreten, was durch die von uns verwendeten Versuchsaufbauten garantiert wird. Zellzyklusbeschleunigungen unter dem Einfluß von EMF wurden auch von anderen Autoren beschrieben (Lit. 20). Unsere Ergebnisse zeigen, daß dieser Effekt von niederfrequenten, aber nicht von den hier verwendeten hochfrequenten Feldern induziert wird. Eine Erklärung für die Zellzyklusbeschleunigung kann nicht gegeben werden. Möglicherweise handelt es sich um eine Beeinflussung des  $Ca^{2+}$ -Einstroms in die Zellen (Lit. 21). Hier sind weitere Untersuchungen notwendig. Die hier verwendeten HF-EMF hatten keinen Einfluß auf die untersuchten Parameter.

## 5 Literatur

- Lit. 1 Fitzner, R.; Langer E.; Zemann, E.; Neibig, U.; Brinkmann, K.: Wachstumsverhalten von humanen Leukämiezellen (Promyelozyten) unter Einfluß von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern (1,8 GHz und 900 MHz, jeweils mit 217 Hz gepulst) zur Prüfung auf krebspromovierende Effekte. Newsletter Edition Wissenschaft Nr. 3 der FGF e.V., Bonn, 1995
- Lit. 2 Meyer, R.; Gollnick, F.; Wolke, S.: Der Einfluß hochfrequenter EM-Felder auf die Calcium-Homöostase von Herzmuskelzellen und Lymphozyten. Newsletter Edition Wissenschaft Nr. 2 der FGF e.V., Bonn, 1995
- Lit. 3 Elsner, R.; Brinkmann, K.; Neibig, U.: Expositionseinrichtungen. Newsletter Edition Wissenschaft Nr. 3 der FGF e.V., Bonn, 1996
- Lit. 4 Eberle, P.; Erdtmann-Vourliotis, M.; Diener, S.; Finke, H.-G.; Löffelholz, B.; Schnor, A.; Schröder, M.: Zellproliferation, Schwesterchromatidaustausche, Chromosomenaberrationen, Mikrokerne und Mutationsrate des HGPRT-Locus, Newsletter Edition Wissenschaft Nr. 4 der FGF e.V., Bonn, 1996
- Lit. 5 Radio- und Mikrowellen, Informationsblatt „Strahlenthemen“ des Bundesamts für Strahlenschutz, Nov. 1994
- Lit. 6: Hansen, V.; Streckert, J.: Feldtheoretische Simulation der Hohlleitungs-Experimente zum Einfluß hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf humane periphere Lymphozyten, Newsletter Edition Wissenschaft Nr. 14 der FGF e.V., Bonn, 1998 (S. 14-23 der vorliegenden Ausgabe)
- Lit. 7: Hansen, V.; Streckert, J.: Konzeption der Hochfrequenz-Expositionseinrichtungen, Einfluß von EMF auf Membranpotential und Membranströme von Herzmuskelzellen, Newsletter Edition Wissenschaft in Vorbereitung
- Lit. 8 Brinkmann, K.; Eisenbrandt, H.; J.P. Grigat; Elsner, R.; Storbeck, W.; Dehmel, G.: Expositionsanlagen, Newsletter Edition Wissenschaft in Vorbereitung
- Lit. 9 Fitzner, R.; Langer, E.; Reitmeier, C. ; Zemann, E.; ...: Wachstumsverhalten von HL-60-Zellen unter Einfluß von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern zur Prüfung auf krebspromovierende Effekte, Newsletter Edition Wissenschaft in Vorbereitung
- Lit. 10 Westphalen, C. v.; Linz, K. W.; Wolke, S.; Meyer, R.: Der Einfluß hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf das Membranpotential und die Membranströme von Herzmuskelzellen, Newsletter Edition Wissenschaft in Vorbereitung
- Lit. 11 Moulder, J.; Foster, K.R. (1995) Biological effects of power-frequency fields as they relate to carcinogenesis. Proc Soc Exp Biol Med 209: 309-324.
- Lit. 12 Saga, L.A. (1996) Electric and Magnetic Fields: Invisible risks? Gordon and Breach Publ. UK
- Lit. 13 Wertheimer, N.; Leeper, E. (1979) Electrical wiring configurations and childhood cancer. Am J Epidemiol 109: 273-284.
- Lit. 14 Frey, A.H. (1995) An integration of the data on mechanisms with particular reference to cancer. In: Frey, A.H. (1995) On the Nature of Electromagnetic Field Interactions with Biological Systems, Springer-Verlag, pp 9-28.

- Lit. 15 McCann, J.; Dietrich, F.; Rafferty, C.; Martin, A.O. (1993) A critical review of the genotoxic potential of electric and magnetic fields. *Mutation Res* 297: 61-95.
- Lit. 16 Murphy, J.C.; Kaden, J.W.; Sivak, A. (1993) Power frequency electric and magnetic fields: A review of genetic toxicology. *Mutation Res* 296: 221-240.
- Lit. 17 Friedberg, E.C.; Walker, G.C.; Siede, W. (1995) DNA Repair and Mutagenesis. ASM Press Washington: 607-618.
- Lit. 18 Antonopoulos, A.; Yang, B.; Stamm, A.; Heller, W.-D.; Obe, G. (1995): Cytological effects of 50 Hz electromagnetic fields on human lymphocytes in vitro. *Mutation Res* 346:151-157.
- Lit. 19 Rosenthal, M.; Obe, G. (1989) Effects of 50-Hertz electromagnetic fields on proliferation and on chromosome alterations in human peripheral lymphocytes untreated or pretreated with chemical mutagens. *Mutation Res* 210: 329-335.
- Lit. 20 Cadossi, R.; Torelli, G.; Cossarizza, A.; Zucchini, P.; Bersani, F.; Petrini, M.; Emilia, G.; Bolognani, L.; Franceschi, C. (1995) In vitro and in vivo effects of low frequency low energy pulsed electromagnetic fields in hematology and immunology. In: Frey AH (1995) *On the Nature of Electromagnetic Field Interactions with Biological Systems*, Springer-Verlag, pp 157-166.
- Lit. 21 Walleczek, J. (1994) Immune cell interactions with extremely low frequency magnetic fields: Experimental verification and free radical mechanisms. In: Frey AH (Ed.) *On the Nature of Electromagnetic Field Interactions with Biological Systems*. Springer-Verlag, New York: pp 167-180.
- Lit. 22 Hill, A.; Wolff, S. (1982) Increased induction of sister chromatid exchanges by diethylstilbestrol in lymphocytes from pregnant and premenopausal women. *Cancer Res* 42: 893-896.
- Lit. 23 Hand, D.J.; Taylor, C.C. (1987) *Multivariate analyses of variance and repeated measures*. Chapman and Hall, London.
- Lit. 24 Antonopoulos, A.; Eisenbrandt, H.; Obe, G. (1997) Effects of high frequency electromagnetic fields on human lymphocytes in vitro. *Mutation Research, Sonderdruck*.
- Lit. 25 Löscher, W.; Mevissen, M. (1994) Animal studies on the role of 50/60 Hertz magnetic-fields in carcinogenesis. *Life Sci.*, 54, 1531-1543.
- Lit. 26 Löscher, W.; Mevissen, M.; Lehmacher, W.; Stamm, A. (1993) Tumor promotion in a breast cancer model by exposure to a weak alternating magnetic field. *Cancer Lett.*, 71, 75-81.
- Lit. 27 Mevissen, M.; Häußler, M.; Löscher, W. (1997) Effects of magnetic field exposure (100 T; 50-Hz) on the development and growth of mammary cancers in a DMBA-model of breast cancer in rats: replicate study. Abstract: Second World Congress for Electricity and Magnetism in Biology and Medicine, 8-13 June 1997, Bologna, Italy, p 158.
- Lit. 28 Natarajan, A.T.; Obe, G. (1982) Mutagenicity testing with cultured mammalian cells: cytogenetic assays. In: Heddle JA (Ed.) *Mutagenicity: New Horizons in Genetic Toxicology*. Academic Press, New York: pp 171-213.
- Lit. 29 Obe, G.; Beek, B. (1982) The human leukocyte test system. In: de Serres FJ, Hollaender A (Eds.) *Chemical Mutagens, Principles and Methods for Their Detection*, Vol 7. Plenum Press, New York: pp 337-400.

- Lit. 30 Obe, G.; Natarajan, A.T. (1993) Mutagenicity testing with cultured mammalian cells: cytogenetic assays. In: Corn M (Ed.) Handbook of Hazardous Materials. Academic Press, New York: pp 453-461.
- Lit. 31 Obe, G.; Natarajan, A.T. (1996) Zytogenetische Methoden. In: Wichmann HE, Schlipkötter HW, Fülgraff G (Eds.) Handbuch der Umweltmedizin. Ecomed, Landsberg/Lech: pp 1-15.
- Lit. 32 Brinkmann, K.; Friedrich, G.: Biologische Wirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder des Mobil- und Polizeifunks, Band 5 der VDE-Buchreihe: Elektromagnetische Verträglichkeit biologischer Systeme, 1997

## 6 Aufstellung der beteiligten Institute

Prof. Brinkmann  
Technische Universität Braunschweig  
Forschungsverbund Elektromagnetische  
Verträglichkeit biologischer Systeme  
Schleinitzstraße 23  
D-38106 Braunschweig

Prof. Obe  
Universität-Gesamthochschule Essen  
Fachbereich 9, Genetik  
Universitätsstraße 5  
D-45141 Essen

Prof. Elsner  
Technische Universität Braunschweig  
Institut für Nachrichtentechnik  
Schleinitzstraße 21-24  
D-38106 Braunschweig

Prof. Hansen  
Bergische Universität  
Gesamthochschule Wuppertal  
Institut für theoretische Elektrotechnik  
Gaußstraße 20  
D-42097 Wuppertal

Prof. Kärner  
Technische Universität Braunschweig  
Institut für Hochspannungstechnik und elektrische  
Anlagen  
Abteilung Hochspannungstechnik  
Schleinitzstr. 23  
D-38106 Braunschweig

Freie Universität Berlin  
Universitätsklinikum Benjamin Franklin  
Institut für Klinische Chemie und Pathobiochemie  
Direktor: Prof. Dr. med. Tauber  
Stellvertreter: OA Dr. med. R. Fitzner  
Hindenburgdamm 30  
D-12200 Berlin

Dr. Meyer  
Rheinische-Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn  
Physiologisches Institut II  
Wilhelmstr. 31  
D-53111 Bonn

Prof. Mönich  
Technische Universität Berlin  
Institut für Nachrichtentechnik und Theoretische  
Elektrotechnik  
Abteilung Hochfrequenztechnik  
Einsteinufer 25  
D-10587 Berlin

### Summary:

# The Effect of High-Frequency Electromagnetic Fields on Cell Cycle and Sister-Chromatid Exchanges: Analyses with Human Lymphocytes in Culture

High-frequency electromagnetic fields found in connection with mobile telephone D and E systems and with the BOS system for authorities with public safety tasks, and their effects on biological systems were studied. The mobile telephone D and E systems frequencies of 0.9 GHz and 1.8 GHz, respectively. They are modulated at the GSM standard. In order to simplify this GSM standard, pulse modulation of a pulse duration of 0.577 ms and pulse period of 4.615 ms were used. The frequency for the BOS system is 380 MHz. In this experiments it was modulated at a pulse duration of 13.11 ms and a pulse period of 56.67 ms. Cells exposed to electromagnetic fields are compared with non-exposed control cells.

To generate the electromagnetic field for the D and E systems, a rectangular hollow waveguide for each system was chosen and constructed at the Technical University of Braunschweig. In both cases, the H10 mode was stimulated. The middle section of the waveguide can be opened to fit the sample holder with polystyrol tubes, filled with 5 ml culture medium and surrounded by a white-oil circuit keeping the temperature of the culture medium at a constant temperature of 37°C.

The input power was calculated in such a way that a desired SAR

value of 208 mW/kg and 1700 mW/kg, respectively, was reached.

A short monopole antenna was put into the waveguide at its rear end. Thus a signal was received, rectified by a high-frequency detector diode and recorded by a personal computer throughout the duration of the experiment.

In the BOS experiment the nutritive medium had to be exposed to a SAR value of 82,9 mW/kg in a TEM cell.

We investigated the velocity of the cell cycle and the frequency of SCE (sister-chromatid exchange) in cultured human lymphocytes exposed to high-frequency electromagnetic fields. Both phenomena were not affected (Lit. 24). This result is of particular interest because in the same test system the cell cycles were accelerated in the presence of 50-Hz/5mT fields, but as with high frequency fields SCE were not induced (Lit. 18, 19). Accelerated cell cycles could be important in connection with a possible cancer induction by electromagnetic fields. Cells already revealing DNA damages would grow faster in the presence of a 50-Hz field and would hence not have sufficient time to repair damages, which in turn would have a higher probability to be transformed to mutations. Accelerated

cell cycles can therefore be regarded as promoting or co-promoting processes with respect to the development of cancer. Similar promoting effects are discussed by Prof. Löscher and co-workers (Lit. 25, 26, 27).

Human lymphocytes are particularly well suited for cell cycle analyses. In the peripheral blood, most of these cells are in the G<sub>0</sub>-phase of the cell cycle. When these cells are cultured and exposed to a mitogenic stimulus (here phytohemagglutinin), they enter the cell cycle synchronously and become mitotically active. The frequencies of first, second and third mitoses in culture (M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub>, M<sub>3</sub>+) thus provide an indication of the velocity of the cell cycle progression. Chromosomal damage, such as SCE, can also be analysed in these cells (Lit. 28, 29, 30, 31).

Cell cycles can also be accelerated by elevated temperatures (Lit. 18). It is thus essential for field exposure tests to preclude any increase in temperature, a condition met by our test installations. Cell cycle acceleration due to the effects of EMF are also described by other authors (Lit. 20). Our findings demonstrate that this effect is induced by low, but not by the high-frequency fields.

Teilprojekt zum Forschungsvorhaben  
„Biologische Wirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder“:

# Feldtheoretische Simulation der Hohlleitungs-Experimente

zum Einfluß hochfrequenter elektromagnetischer Felder  
auf humane periphere Lymphozyten

Prof. Dr. Ing. V. Hansen und Dipl.-Ing. J. Streckert, Lehrstuhl für Theoretische Elektrotechnik,  
Bergische Universität - Gesamthochschule Wuppertal

## 1. Einleitung und Übersicht

Dieser Beitrag faßt die Ergebnisse der Überlegungen und Berechnungen zur Konzipierung der Hohlleitungs-Expositionseinrichtungen für das Teilprojekt „Analysen an menschlichen Lymphozyten in Kultur“ [1] des Verbundprojekts „Der Einfluß von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern“ zusammen. Die Expositionseinrichtungen wurden an der Universität Wuppertal entworfen und numerisch modelliert und durch Prof. Dr. Elsner von der Technischen Universität Braunschweig realisiert.

Nach einer kurzen Darstellung der wesentlichen Anforderungen an geeignete Hochfrequenz-(HF)-Expositionseinrichtungen für Mobilfunkfrequenzen (Abschnitt 2) soll in Abschnitt 3 ein Lösungskonzept mit Dimensionierungsangaben für Meßzellen bei 900 MHz (D-Netz) und 1800 MHz (E-Netz) geschildert werden. Die Charakterisierung der Meßzellen wird abgerundet durch numerische Feldberechnungen, deren wichtigste Resultate in Abschnitt 4 genannt werden. Abschnitt 5 schließt den Bericht mit einer kurzen Zusammenfassung ab.

## 2. Anforderungen an die HF-Expositionseinrichtungen

Die Exposition der Proben mit elektromagnetischen Feldern bei Mobilfunkfrequenzen muß unter bestimmten Randbedingungen erfolgen, aus denen Konzepte für die Konstruktion der Gesamt-Experimentiereinrichtungen entwickelt wurden.

### 2.1 Frequenzen

Die HF-Exposition der Proben soll mit typischen Signalen des D- und des E-Netzes erfolgen. Dies bedeutet für das D-Netz eine Nenn-Trägerfrequenz von 900 MHz, einen Trägerfrequenzbereich von

890 MHz < f < 960 MHz und eine Modulation äquivalent zum GSM-Standard, für das E-Netz eine Nennfrequenz von 1800 MHz, einen Betriebsfrequenzbereich von 1710 MHz < f < 1880 MHz und eine Modulation äquivalent zum DCS1800-Standard.

Für die durchzuführenden biologischen Experimente ist es nicht erforderlich, die für Kommunikationszwecke eingeführten Modulationsstandards GSM und DCS1800 in allen Einzelheiten nachzubilden. Den Vorschlägen des „Leitfadens für Experimente zur Untersuchung der Wirkung hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf biologische Systeme – Hochfrequenztechnische Aspekte“ der Forschungsgemeinschaft Funk [2] folgend, wird anstelle des tatsächlichen Mobilfunksignals ein rechteckförmig amplitudenmoduliertes HF-Signal verwendet, das durch seine Trägerfrequenz, die Länge der rechteckförmigen HF-Pakete (Bursts) von 0,577 ms und den Abstand zwischen zwei Bursts im Bereich von 4,6 ms bis 0,5 s, je nach zu modellierendem Gesprächsmodus, charakterisiert ist.

### 2.2 Spezifische Absorptionsrate

Die Spezifische Absorptionsrate (SAR) in den Proben sollte über die Variation der Sendeleistung zwischen ca. 10 mW/kg und mindestens 80 mW/kg einstellbar sein. Der letztgenannte Wert stellt für den hier interessierenden Frequenzbereich den in DIN VDE 0848 Teil 2 [3] festgeschriebenen Grenzwert für eine Ganzkörpereinwirkung bei Langzeitbestrahlung dar.

Weitere genormte Eckdaten sind 2 W/kg für die Exposition lokal begrenzter Bereiche und 4 W/kg für die elektromagnetische Einwirkung auf Hand oder Fuß.

### 2.3 Zugänglichkeit der Probe

Die Proben sollten bequem austauschbar sein. Ferner ist ein ständiger Durchfluß des Wärmemittels zu gewährleisten. Es sind also verschiedene Zugangsmöglichkeiten zu der Expositionseinrichtung vorzusehen.

### 2.4 HF-Dichtigkeit und Schirmung

Zur effektiven, allenfalls durch geringe Strahlungsverluste begleiteten Feldexposition der Proben und zur Vermeidung von Störstrahlung nach innen und außen sollte eine möglichst HF-dichte Expositionseinrichtung konzipiert werden. Daß diese Forderung teilweise mit Punkt 2.3 kollidieren kann, liegt auf der Hand.

Eine Schirmwirkung hinsichtlich niederfrequenter Magnetfelder ist technisch nur sehr aufwendig erreichbar.

### 2.5 Eindeutigkeit und Reproduzierbarkeit des HF-Feldes

Zur Berechnung von SAR-Werten benötigt man die Kenntnis der elektrischen Feldstärke in der bestrahlten Materie.

Eine direkte Messung des auf die Probe einwirkenden Feldes ist aber wegen der durch jede Meßsonde verursachten Feldstörungen unmöglich. Man ist deshalb darauf angewiesen, auf indirektem Weg, beispielsweise durch Bestimmung von Feldstärke/Leistungs-Verhältnissen mit Hilfe numerischer Modellrechnungen, auf die lokale Feldverteilung bei bekannter eingestrahelter Gesamtleistung zu schließen. Unabdingbare Voraussetzung für die Anwendbarkeit einer derartigen Methode ist eine Expositionseinrichtung, die bei festgelegten Versuchsbedingungen eindeutige, stabile und reproduzierbare Feldverteilungen in der Probe erzeugt.

### 2.6 Feldvariation in den Proben

Es sollen gleichzeitig mehrere Proben (Nährlösung mit Blutzellen) von je 5 cm<sup>3</sup> untersucht werden; die Probengefäße sind zur Temperaturstabilisierung auf 37°C in einem Wärmetauscher unterzubringen. Die Temperaturregelung wurde von Prof. Elsner erstellt.

Da sich die Aufenthaltsorte der zu untersuchenden Blutzellen in den Probengefäßen während eines Experiments ständig verändern, wäre eine HF-Expositionseinrichtung wünschenswert, die über dem gesamten Probenvolumen eine homogene Feldverteilung zur Verfügung stellt. Dieser Wunsch ist physikalisch nicht erfüllbar, da auch ein ursprünglich homogenes Feld durch Einbringen der Proben ortsabhängig verändert wird, sobald die Probe nicht das gesamte felderfüllte Volumen einnimmt, wie es bei Experimenten der vorliegen-

den Art der Fall ist. Allerdings kann die Feldstärkevariation in gewissen Grenzen durch Form und Größe des Probenvolumens beeinflusst werden.

## 2.7 Eigenschaften des Probenhalters

Als Probenhalter wird in diesem Zusammenhang nicht nur das eigentliche Gefäß für die Probenflüssigkeit mit den zu untersuchenden Zellen verstanden, sondern auch die im Expositionsbereich befindlichen Behälter und Zuführungen von Hilfsmitteln, wie Kühlflüssigkeiten, einschließlich ihrer Befestigungen. Es wäre vorteilhaft, den Probenhalter so zu dimensionieren, daß er nur eine lokale Störung des angelegten HF-Feldes darstellt. Materialien hoher elektrischer Leitfähigkeit, insbesondere Metallteile, sollten nicht verwendet werden. Zur Erfüllung der in Abschnitt 2.6 genannten Forderungen sollte immer eine definierte Position des Probenhalters im Feld gewährleistet sein.

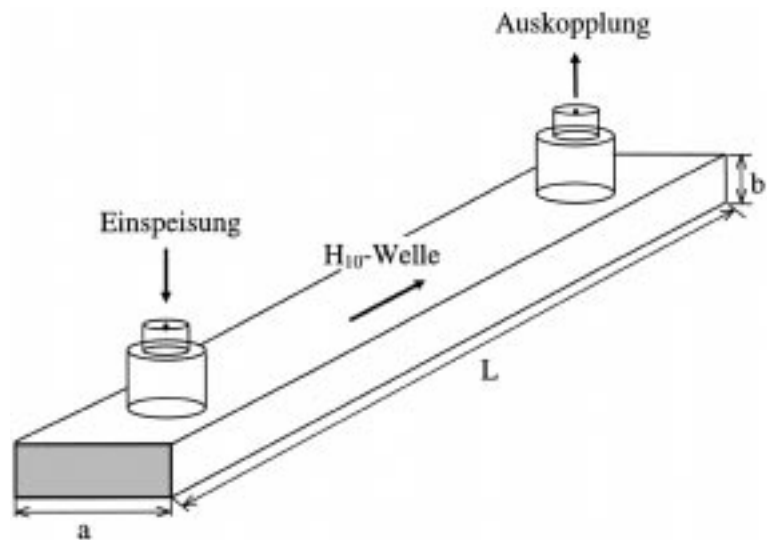


Bild 1: Rechteck-Hohlleitungsmeßzelle

## 3. Lösungskonzept

### 3.1 Versuchsaufbau mit HF-Exposition

Die in Abschnitt 2 genannten Anforderungen können im wesentlichen erfüllt werden, wenn die Feldexposition der Proben innerhalb einer Hohlleitungs-

Meßzelle mit rechteckigem Querschnitt stattfindet (Bild 1), in der sich allein die Grundmode ( $H_{10}$ -Welle) als rein fortschreitende Welle ausbreitet. Die beiden letztgenannten Punkte sind dabei essentiell, denn sowohl die Ausbreitungsfähigkeit weiterer Wellentypen als auch die Überlagerung hin- und rücklaufender Wellen machen die Forderung nach Eindeutigkeit und Reproduzierbarkeit der Feldverteilung unerfüllbar.

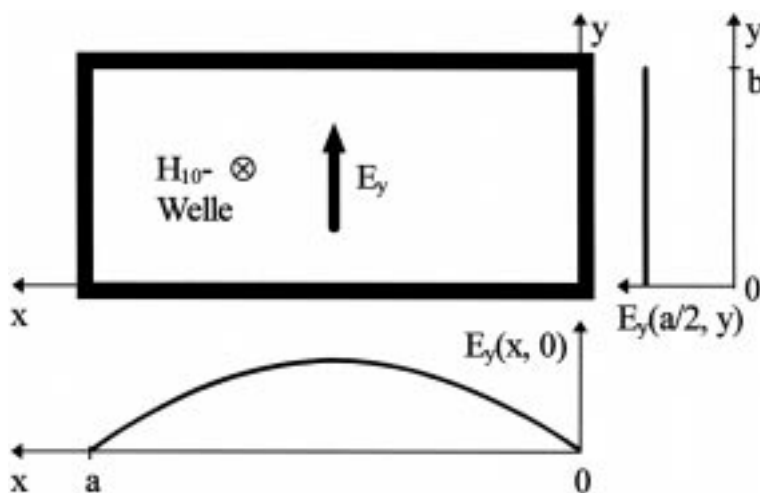


Bild 2: Elektrische Feldverteilung der  $H_{10}$ -Welle

Bild 2 zeigt den Verlauf der linear in  $y$ -Richtung polarisierten elektrischen Feldstärke der  $H_{10}$ -Welle im Hohlleitungsquerschnitt.

Für die durchzuführenden Experimente hat es sich durch Voruntersuchungen als sinnvoll herausgestellt, den als Probenhalter ausgebildeten Wärmetauscher mit maximal sechs hintereinander liegenden Probengefäßen in der hochkant gestellten Meßzelle unterzubringen (vgl. Bild 3).



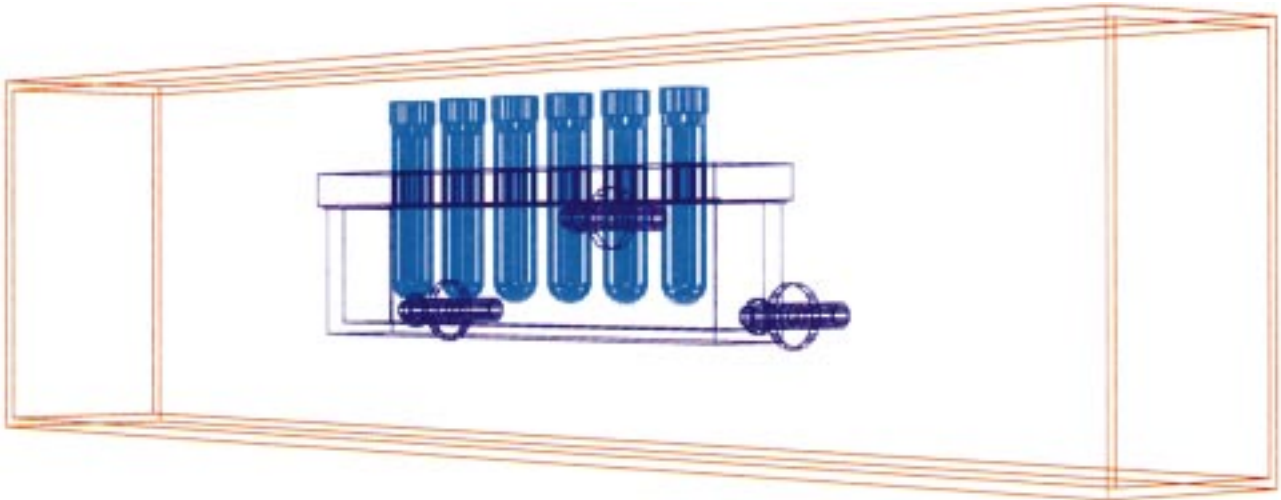


Bild 3: Probenanordnung in der Hohlleitung

## 3.2 Dimensionen und Betriebsdaten der Meßzellen

Die Festlegung der Abmessungen der benötigten Meßzellen erfolgt nach bewährten Kriterien [4] unter Berücksichtigung des stabilen Frequenzbereichs der Grundmode, der hinreichenden Unterdrückung von Störmoden und der durch die Probenabmessungen bedingten Bauhöhen. Tabelle 1 gibt die Innenmaße (vgl. Bild 1) und die wesentlichen Betriebseigenschaften der leeren Hohlleitungs-Meßzellen an.

Die Grenzfrequenz  $f_c$  der E-Netz-Meßzelle mußte mit 949 MHz ungewöhnlich niedrig gewählt werden, um die Proben in der Meßzelle unterbringen zu können. Trotzdem ist ein Betrieb auch bei 1875 MHz noch mit mehr als 20 dB Störmodendämpfung möglich.

## 3.3 HF-Einspeisung

Zur Ein- und Auskopplung der HF-Signale werden Koppelvorrichtungen benötigt, die einen möglichst reflexions- und verlustarmen Übergang von einer 50  $\Omega$ -

Koaxialleitung in die Meßzelle und umgekehrt gewährleisten. Die Konzeption einer Koppelvorrichtung sieht hier ein dreiteiliges Koppellement mit Koaxialbuchse, Flansch und Koppelkörper (Bild 4) sowie eine am Ende kurzgeschlossene Stichleitung der Länge  $L_s$  vor. Damit stehen mehrere Parameter zur Verfügung, die zur Optimierung der Einkopplung variierbar sind (Länge  $L_s$ , Flansch-Innendurchmesser  $D$ , Form des Koppelkörpers, Eintauchtiefe  $T$ ). Durch numerische Modellrechnungen lassen sich diese Parameter für eine gegebene Hohlleitung abschätzen. Dabei

Experiment	Maß a in cm	Maß b in cm	Länge L in cm	Grenzfrequenz $f_c$ in MHz	Frequenzbereich in MHz *)	Störmodendämpfung in dB **)	Feldstärke bei 1W in V/m ***)
D-Netz	25,9	12,95	130	579	724 - 1100	> 40	242
E-Netz	15,8	7,9	130	949	1187 - 1803	> 20	377

Tabelle 1: Innenmaße und Betriebseigenschaften der konzipierten Meßzellen

Bemerkungen: \*)  $1,25 f_c \leq f \leq 1,9 f_c$ ;

\*\*) bei 960 MHz (D-Netz) bzw. 1875 MHz (E-Netz);

\*\*\*) Scheitelwert bei 900 bzw. 1800 MHz auf der Hohlleitungsachse

# Berechnungen

kommt insbesondere der Geometrie des Koppelkörpers eine wesentliche Bedeutung zu. Der Feinabgleich beispielsweise der Eintauchtiefe erfolgt unter meßtechnischer Kontrolle des Reflexionsfaktors. Der Bau und die mechanische Abstimmung der Koppelvorrichtungen erfolgten durch Prof. Elsner, TU Braunschweig.

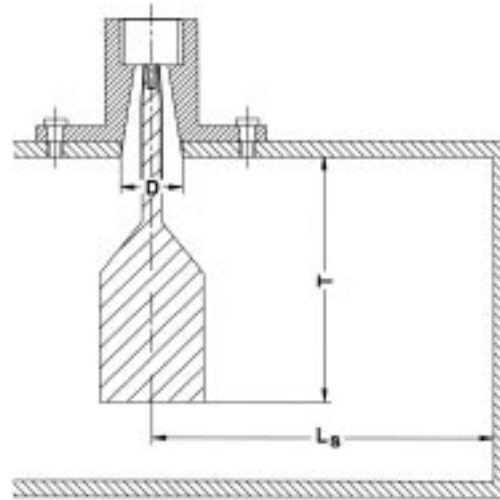


Bild 4: Prinzipschema einer Koppelvorrichtung

## 4. Numerische Feldberechnungen

### 4.1 Vorgehensweise

Unter den in Abschnitt 2.5 genannten Bedingungen läßt sich die maximale elektrische Feldstärke der ungestörten H<sub>10</sub>-Welle in einer leeren Hohlleitung eindeutig aus der eingespeisten Leistung P über

$$|\vec{E}_0| = \sqrt{\frac{P}{ab} \frac{4Z_0}{\sqrt{1-(f/f_c)^2}}} \quad (1)$$

mit  $Z_0 = 377 \Omega$  berechnen. Der räumliche Feldverlauf ist aus Bild 2 bekannt.

Durch Einbau von Öffnungen für die Schlauchdurchführungen und Einsetzen des Wärmetauschers

mit den Probengefäßen einschließlich ihrer Füllungen wird die ursprüngliche Feldverteilung mehr oder weniger stark verändert. Eine genaue Ermittlung der Feldverteilung in der mit diesen Modifikationen versehenen Hohlleitung ist nur durch numerische Feldberechnungen in der kompletten Struktur möglich.

Ausgangspunkt ist dabei das bekannte Feld der ungestörten Leitung, aus dem unter Berücksichtigung aller Strukturdetails das veränderte Feld schrittweise entwickelt wurde. Teilweise konnten dazu kommerziell erhältliche Feldlöser, wie das Programm-

paket „XFDTD“ [5], unmittelbar eingesetzt werden.

Mit bekannter elektrischer Feldstärke folgt dann die lokale spezifische Absorptionsrate in der eingebrachten Probe aus

$$\text{SAR} = \frac{1}{2} \frac{\kappa}{\rho} |\vec{E}_0|^2 \quad (2)$$

Darin bedeuten  $\kappa$  und  $\rho$  die elektrische Leitfähigkeit bzw. die Dichte des Probenmaterials.

### 4.2 Materialparameter

Sowohl zur Bestimmung der elektrischen Feldstärkeverteilung als auch zur Berechnung der SAR-Werte werden demzufolge die Materialparameter der zu modellierenden Struktur benötigt. Bei gebräuchlichen Materialien, wie z.B. Acrylglas, kann man dazu auf Literaturangaben zurückgreifen. Für die aufgrund der biologisch/physiologischen Erfordernisse der Experimente benötigten Stoffe, wie z.B. Nährlösungen für die Blutzellen, sind aber insbesondere

Material	Frequenz	Permittivität $\epsilon_r'$	Leitfähigkeit $\kappa$	Quelle
Acrylglas (Probengefäße)	900 MHz	2,6	0,002 S/m	[5]
	1800 MHz	2,6	0,0039 S/m	
PVC, grau (Wärmetauscher)	900 MHz	2,5	0,0050 S/m	[5]
	1800 MHz	2,4	0,0095 S/m	
Weißöl, 37 °C (Wärmemittel)	900 MHz	2,2	0,0017 S/m	[5]
	1800 MHz	2,2	0,0033 S/m	
McCoy's-5A, 37 °C (Nährlösung)	900 MHz	72,5	2,00 S/m	[5]
	1800 MHz	72,5	2,49 S/m	

Tabelle 2: Elektrische Daten der für die Rechnersimulationen angenommenen Materialien

re die elektrischen Eigenschaften häufig unbekannt. Den numerischen Berechnungen wurden daher für die Permittivität  $\epsilon_r'$  und die Leitfähigkeit  $\kappa$  Werte zugrunde gelegt, die durch frequenzabhängige Messungen mit einem Netzwerkanalysator und einem „Dielectric Probe Kit“ von Hewlett-Packard ermittelt worden waren. Die dielektrischen Daten einiger Materialien sind in Tabelle 2 eingetragen. Es wurde jeweils eine relative Permeabilität von  $\mu_r = 1$  angenommen.

### 4.3 Feldverteilungen und SAR-Abschätzung in den Proben

Wie in Abschnitt 4.1 erläutert wurde, erfordert die Berechnung der elektromagnetischen Feldverteilung innerhalb der mit den für die Experimente benötigten Komponenten versehenen Hohlleitung die Berücksichtigung aller Strukturdetails, die vom Fall der leeren, ungestörten Meßzelle abweichen. Es ist dabei nicht sinnvoll, den Einfluß einzelner Modifikationen, z.B. des Wärmetauschergehäuses, auf das HF-Feld getrennt zu untersuchen, weil sich die Auswirkungen aller Störungen in komplizierter Weise überlagern und gegenseitig beeinflussen können, so daß nur die Modellierung der kompletten Struktur und die darauf basierende Berechnung der Feldverteilung im interessierenden Probenbereich als Reaktion auf die Einstrahlung der  $H_{10}$ -Welle die tatsächlichen Verhältnisse adäquat beschreibt.

Das für die E-Netz-Hohlleitungsmeßzelle verwendete Rechenmodell ist bereits aus Bild 3 bekannt.

In Bild 5 ist der Betrag der elektrischen Feldstärke in der xz-Ebene durch die Mitte der Hohlleitung dargestellt. Man erkennt eine geringe Stehwelligigkeit vor dem Wärmetauscher und eine deutliche Dämpfung der  $H_{10}$ -Welle durch die Proben.

Auch innerhalb einer Einzelprobe fällt eine starke Feldvariation auf (vgl. Bild 6: Elektrische Feldverteilung im Hohlleitungsquerschnitt durch Probe Nr. 1). Entsprechend schwankt der Wert für die lokale spezifische Absorptionsrate.

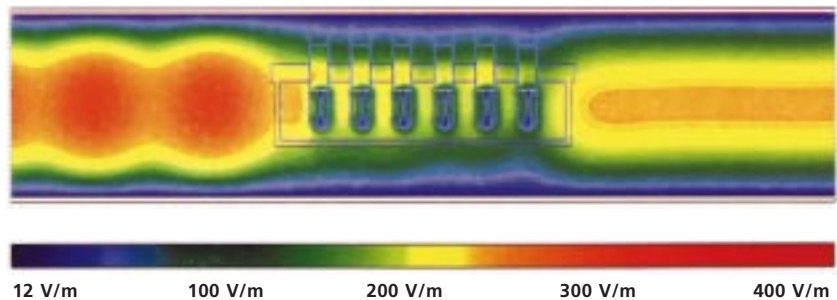


Bild 5: Elektrische Feldverteilung in der E-Netz-Hohlleitungsmeßzelle

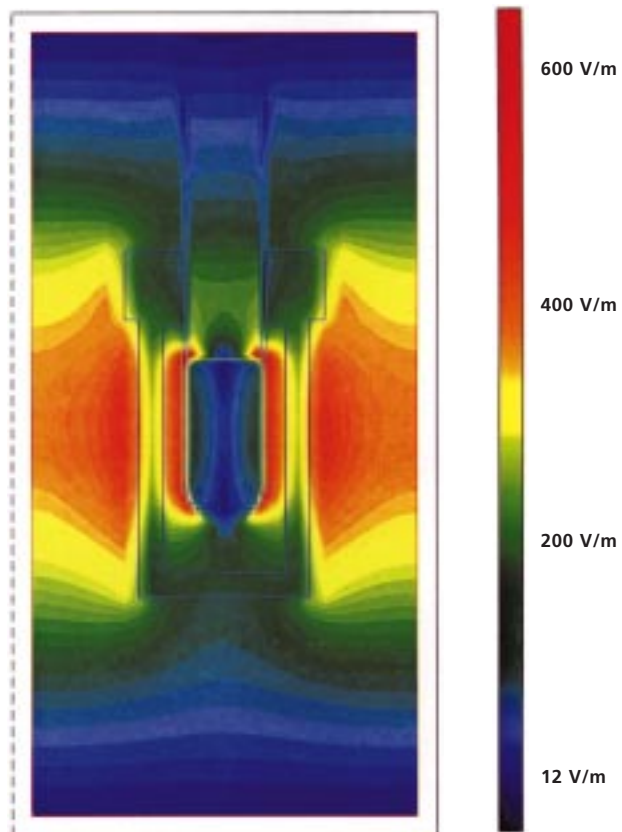


Bild 6: Elektrische Feldverteilung im Hohlleitungsquerschnitt durch Probe Nr. 1 aus Bild 5

# Berechnungen

Probe Nr.	$E_{\min}$ [V/m]	$E_{\max}$ [V/m]	$SAR_{\min}$ [W/kg]	$SAR_{\max}$ [W/kg]	$P_v$ [mW]	$SAR_{\text{mittel}}$ [W/kg]
1	25,9	172,8	0,833	37,2	105,0	21,0
2	22,3	165,3	0,622	34,0	96,4	19,3
3	22,2	154,7	0,613	29,8	83,4	16,7
4	20,6	149,3	0,531	27,8	78,9	15,8
5	18,5	128,4	0,426	20,5	58,7	11,7
6	18,1	130,1	0,410	21,1	57,9	11,6

Tabelle 3: Feldstärke und SAR in den Einzelproben der E-Netz-Meßzelle;  
Eingespeiste HF-Leistung: 1 W;  
Feldstärke der anregenden  $H_{10}$ -Welle auf der Hohlleitungsachse: 377,1 V/m

$E_{\min}$	18,1 V/m
$E_{\max}$	172,8 V/m
$SAR_{\min}$	0,4 W/kg
$SAR_{\max}$	37,2 W/kg
$SAR_{\text{mittel}}$	15,8 W/kg
$SAR_{\max}/SAR_{\min}$	90,7
$SAR_{\text{mittel, max}}/SAR_{\text{mittel, min}}$	1,8

Tabelle 4: Feldstärken und spezifische Absorptionsraten über alle sechs Proben in der E-Netz-Meßzelle;  
Eingespeiste HF-Leistung: 1 W

Probe Nr.	$P_v$ [mW]	$SAR_{\text{mittel}}$ [W/kg]
1	1,46	0,292
2	1,44	0,288
3	1,48	0,296
4	1,50	0,300
5	1,47	0,295
6	1,43	0,285

Tabelle 5: Verlustleistung und SAR in den Einzelproben der D-Netz-Meßzelle;  
Eingespeiste HF-Leistung: 1 W;  
Feldstärke der anregenden  $H_{10}$ -Welle auf der Hohlleitungsachse: 242 V/m

Die Auswertung je Probe nach elektrischer Feldstärke und SAR-Verteilung im Probenvolumen ist in Tabelle 3 für eine eingespeiste Leistung von 1 W vor Einschalten der Modulation angegeben. Zusätzlich wurde über die in der jeweiligen Probe umgesetzte Joulesche Verlustleistung  $P_v$  ein mittlerer SAR-Wert berechnet.

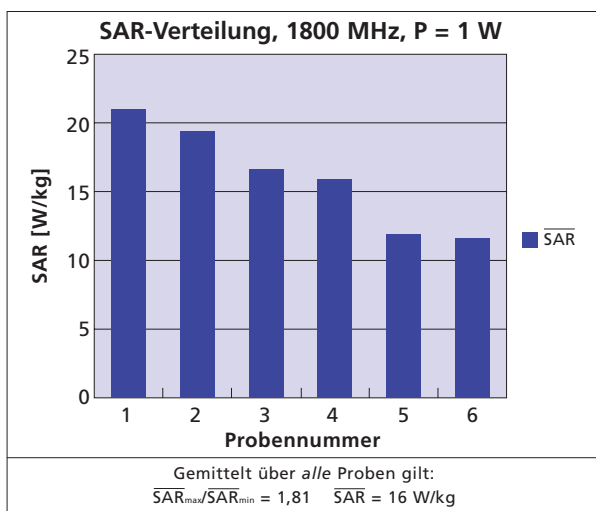


Bild 7: Verteilung der mittleren spezifischen Absorptionsrate in der E-Netz-Meßzelle

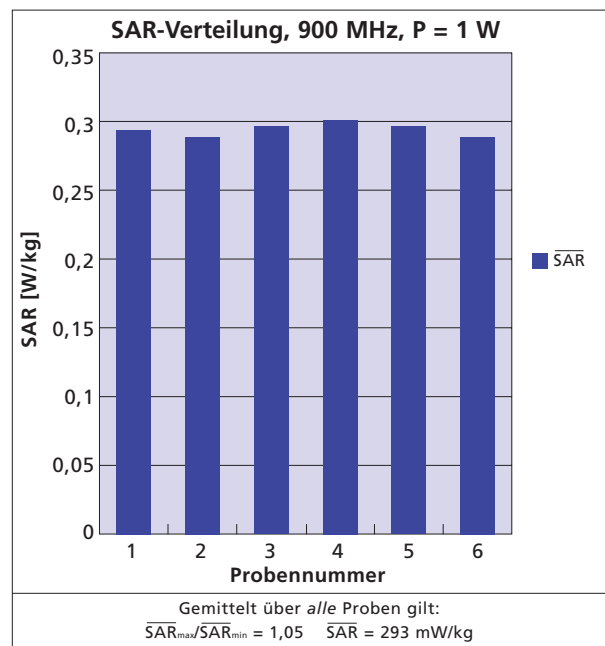


Bild 8: Verteilung der spezifischen Absorptionsrate in der D-Netz-Meßzelle

Aus den genannten Daten kann die Variation der Feldstärke und der SAR-Werte *über alle Proben* ermittelt werden (s. Tabelle 4).

Während die SAR-Werte innerhalb einer Probe sehr stark streuen ( $SAR_{max}/SAR_{min}$  in Tabelle 3), weichen die mittleren SAR-Werte der Einzelproben nur um maximal 30% vom Mittelwert des gesamten Probenvolumens ab ( $SAR_{mittel}$  in Tabelle 4). Bild 7 veranschaulicht dies in Form eines Balkendiagramms. Eine homogenere Belastung der Proben ließe sich nur durch eine drastische Änderung der Form der Probengefäße erreichen, was aber bei diesen Experimenten aus Gründen der Handhabbarkeit und der Sterilität nicht möglich war.

Die Ergebnisse für die D-Netz-Meßzelle fallen in dieser Hinsicht günstiger aus. Im Rechenmodell wurden gegenüber Bild 3 lediglich die Abmessungen der Hohlleitung verändert; das Diskretisierungsgitter zur Feldsimulation besteht nun aus ca. 2,2 Millionen Gitterpunkten. Tabelle 5 zeigt die in den Proben umgesetzten Verlustleistungen und die mittleren SAR-Werte, Bild 8 das entsprechende SAR-Balkendiagramm.

Das Verhältnis  $SAR_{max}/SAR_{min}$  über alle Proben liegt bei 1,05, d.h., die Abweichung der Mittelwerte für die Einzelproben vom mittleren SAR-Wert für das gesamte Probenvolumen  $SAR_{mittel} = 0,293$  W/kg beträgt nur noch maximal 3%.

Im Vergleich zu der E-Netz-Meßzelle ist dies durch die größeren Querschnittsabmessungen und

die niedrigere Betriebsfrequenz bedingt; allerdings liegt bei gleicher eingespeister Leistung der mittlere SAR-Wert für die D-Netz-Meßzelle um mehr als

eine Größenordnung niedriger als beim E-Netz. Auch an den Feldverteilungen Bild 9 und 10 wird die homogenere Probenbelastung bei 900 MHz deutlich.

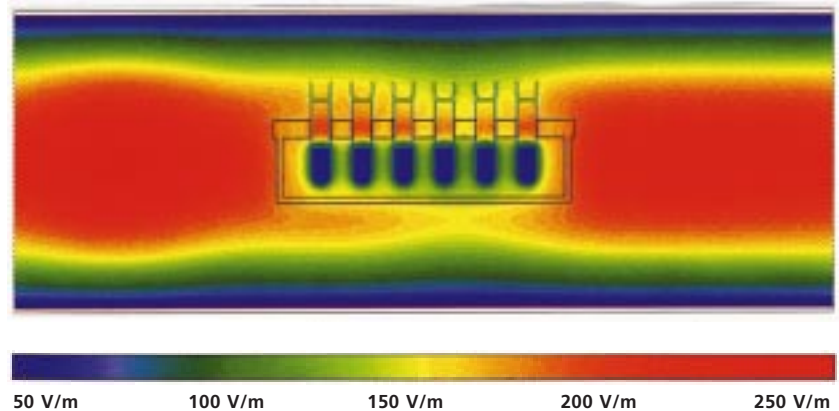


Bild 9: Elektrische Feldverteilung in der D-Netz-Hohlleitungsmeßzelle

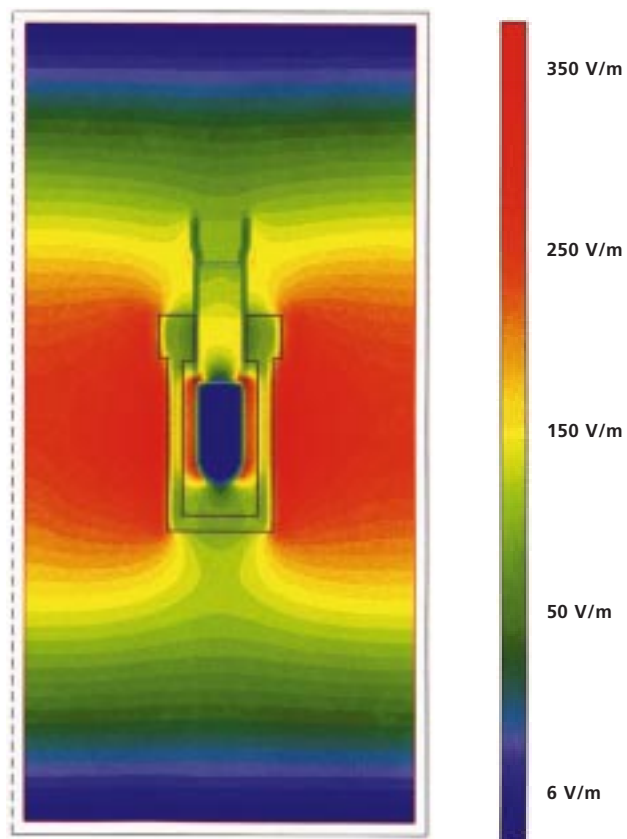


Bild 10: Feldverteilung im Hohlleitungsquerschnitt durch Probe Nr. 1 aus Bild 9

## 5. Zusammenfassung

Unter Berücksichtigung aller experimentellen Anforderungen der Essener Projektpartner wurden Meßapparaturen für die Feldexposition bei Mobilfunkfrequenzen konzipiert, die jeweils als Kernstück eine Hohlleitungs-

Meßzelle mit rechteckigem Querschnitt enthalten. Mit umfangreichen numerischen Simulationsrechnungen wurden die während eines Experiments zu erwartenden Verteilungen des Feldes und der spezifischen Absorptionsrate bestimmt. Der Anwender hat damit die Möglichkeit, durch Wahl der eingespeisten Leistung die gewünschten

SAR-Werte in den Proben einzustellen.

Ein Teil der dargestellten und weitere Ergebnisse auch zu anderen Projekten sind im VDE-Verlag unter dem Titel „Biologische Wirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder des Mobil- und Polizeifunks“ publiziert [7].

## 6. Literatur

- [1] Antonopoulos, A., Obe, G., Brinkmann, K., Eisenbrandt, H., Grigat, J.P., Elsner, R., Storbeck, W. und Dehmel, G.: Der Einfluß von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern auf den Zellzyklus und auf die Frequenz von Schwesterchromatidaustauschen: Analysen an menschlichen Lymphozyten in Kultur. Newsletter Edition Wissenschaft Nr. 14 der FGF e.V., Bonn, 1998 (S. 3-13 der vorliegenden Ausgabe).
- [2] Hansen, V.: Leitfaden für Experimente zur Untersuchung der Wirkung hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf biologische Systeme – Hochfrequenztechnische Aspekte. Newsletter Edition Wissenschaft Nr. 11 der FGF e.V., Bonn, 1996.
- [3] DIN VDE 0848 Teil 2: Sicherheit in elektromagnetischen Feldern; Schutz von Personen im Frequenzbereich 30 kHz bis 300 GHz. April 1993.
- [4] Meinke, H., Gundlach, F. W.: Taschenbuch der Hochfrequenztechnik. Hrsg. K. Lange und K.-H. Löcherer, 5. Aufl., Springer-Verlag, Berlin 1992
- [5] Remcom, Inc.: XFDTD Vs. 3.05, Calder Square, State College, PA, 1996
- [6] Neibig, U.: Expositionseinrichtungen. Newsletter Edition Wissenschaft Nr. 3 der FGF e.V., Bonn, 1996.
- [7] Streckert, J., Hansen, V.: Konzeption von Hochfrequenz-Expositionseinrichtungen für die Experimente in Bonn und Essen, in: Brinkmann, K., Friedrich, G. (Hrsg.): Elektromagnetische Verträglichkeit biologischer Systeme, Bd. 5, VDE-Verlag, Berlin 1997

# Summary

The essential features of exposure equipments for investigating the effect of modulated radio frequency radiation around 900 MHz and 1800 MHz on human blood cells are described.

The peripheral lymphocytes were cultivated in a nutrient solvent, 5 cm<sup>3</sup> of which was filled into each of several test tubes. The technical task was to develop rf exposure systems achieving well-defined and reproducible

electromagnetic field distributions at high SAR to power conversion ratios and yielding an exposure of the culture medium as uniform as possible among the different tubes at maximum overall test volume.

As basic components two rectangular waveguides were chosen and designed for fundamental mode operation in the two frequency bands. With help of extensive numerical field calcula-

tions the suitable number and location of the test tubes inside the waveguides could be determined. The electrical properties of the biological material were acquired by measurements. A number of 6 tubes arranged along the waveguide axes was found to be a good compromise between test volume and field homogeneity.

Detailed data of waveguide dimensions, field strengths and specific absorption rates are given.



## **Impressum**

### **Edition Wissenschaft der FGF e.V.**

**Herausgeber:** Forschungsgemeinschaft Funk e.V., Rathausgasse 11a,  
D-53111 Bonn, Telefon: 0228 / 72622-0, Telefax: 0228 / 7262211

**Redaktion:** Gerd Friedrich (verantw.)

**Grafik, Satz, Layout:** Autoren Societät, Bonn

Die vorliegende Studie wurde im Auftrag der Forschungsgemeinschaft Funk e.V. durchgeführt. Die Berichte geben die Meinungen der Autoren wieder und stellen daher nicht unbedingt auch die Meinung der FGF dar.

**ISSN 1430-1458**